



Exploration de modèles en épidémiologie des paysages agricoles

Journée Exploration, calibration et validation de modèles numériques complexes pour l'environnement

Julien Papaïx





Introduction



La **diversification des cultures** (inter et intra spécifique) à l'échelle d'un paysage est un principe clef dans la **gestion durable des épidémies** en milieu agricole.

⇒ Nécessité de définir des **stratégies de déploiement raisonné** des différentes cultures.

La **diversification des cultures** (inter et intra spécifique) à l'échelle d'un paysage est un principe clef dans la **gestion durable des épidémies** en milieu agricole.

⇒ Nécessité de définir des **stratégies de déploiement raisonné** des différentes cultures.

Lien structure spatiale - résistance aux épidémies étudié à des échelles temporelles différentes, et soit avec des **critères démographiques**, soit avec des **critères évolutifs** :

⇒ **pas de vision globale** de la meilleure stratégie de déploiement spatial des cultures prenant en compte la dynamique démo-génétique des populations pathogènes.

Questions



1. Quelle est la **stratégie optimale d'allocation de cultures** dans l'espace et le temps ?
2. **Varie-t-elle au cours de la vie d'une culture** en réponse à l'évolution des populations pathogènes ?

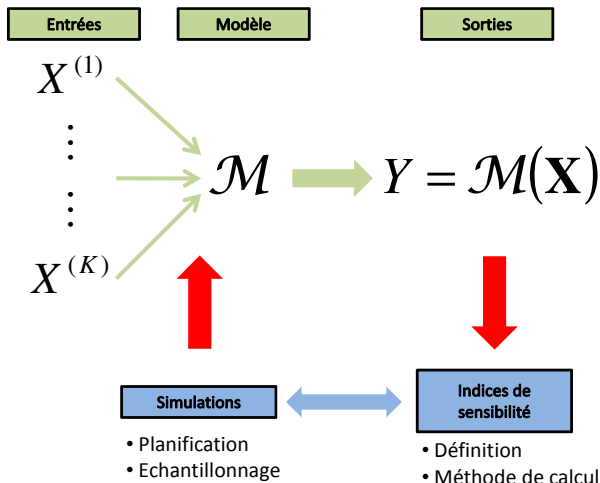
Questions

1. Quelle est la **stratégie optimale d'allocation de cultures** dans l'espace et le temps ?
2. **Varie-t-elle au cours de la vie d'une culture** en réponse à l'évolution des populations pathogènes ?

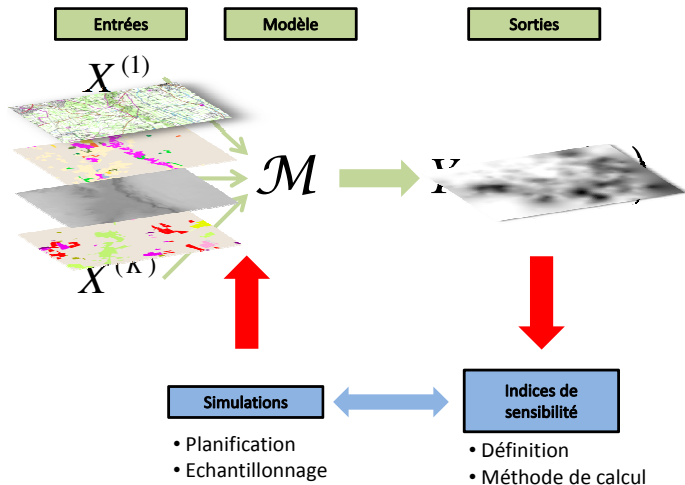


Analyse de sensibilité spatialisée

Analyse de sensibilité spatialisée



Analyse de sensibilité spatialisée



Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

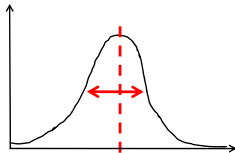
Caractérisé par des descripteurs θ_i

Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i

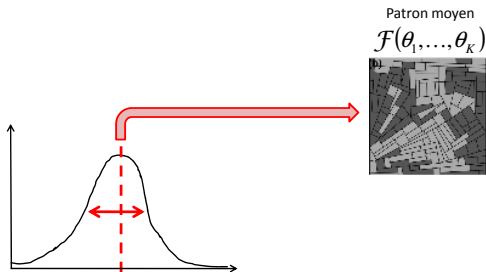


Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i

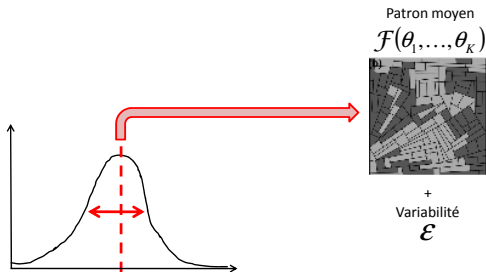


Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i

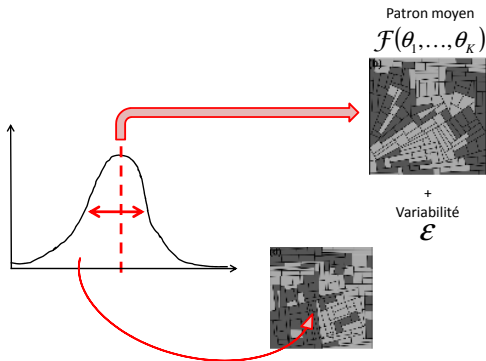


Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i

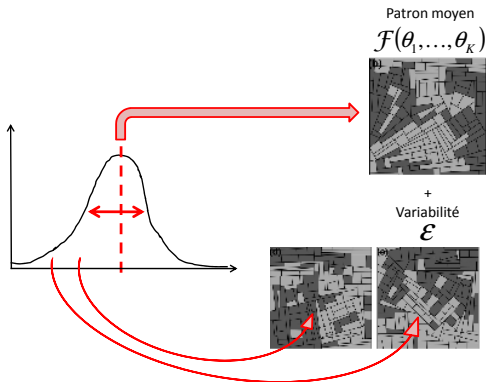


Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i

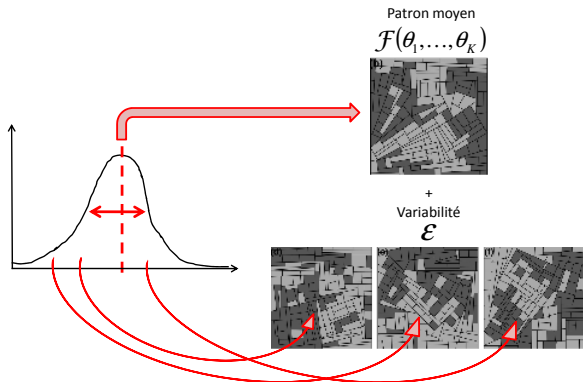


Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i

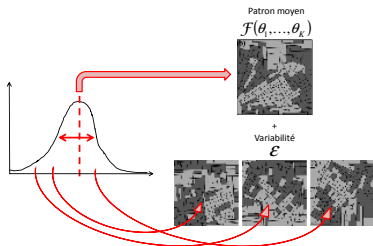


Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i



Quatre cas possibles :

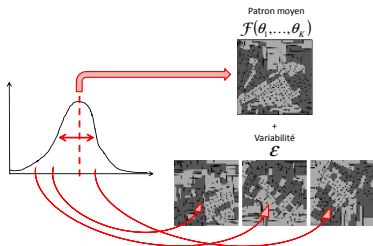
- ▶ le paysage est généré par un processus inconnu,
 1. pas de caractérisation du patron moyen,
 2. descripteurs exhaustifs,
 3. descripteurs non-exhaustifs.
- 4. le paysage est généré par un processus connu,

Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i



Quatre cas possibles :

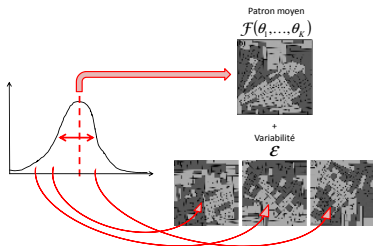
- ▶ le paysage est généré par un processus inconnu,
 1. pas de caractérisation du patron moyen,
 2. descripteurs exhaustifs,
 3. descripteurs non-exhaustifs.
- 4. le paysage est généré par un processus connu,

Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i



Quatre cas possibles :

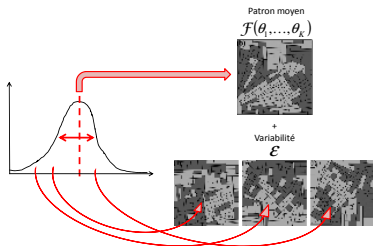
- ▶ le paysage est généré par un processus inconnu,
 1. pas de caractérisation du patron moyen,
 2. descripteurs exhaustifs,
 3. descripteurs non-exhaustifs.
- 4. le paysage est généré par un processus connu,

Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i



Quatre cas possibles :

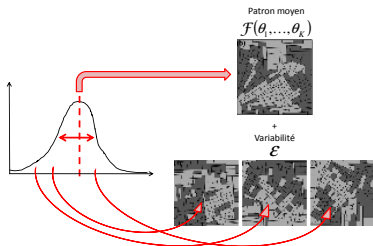
- ▶ le paysage est généré par un processus inconnu,
 1. pas de caractérisation du patron moyen,
 2. descripteurs exhaustifs,
 3. descripteurs non-exhaustifs.
- 4. le paysage est généré par un processus connu,

Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i



Quatre cas possibles :

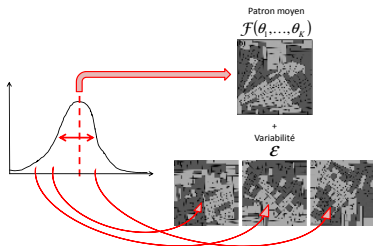
- ▶ le paysage est généré par un processus inconnu,
 1. pas de caractérisation du patron moyen,
 2. descripteurs exhaustifs,
 3. descripteurs non-exhaustifs.
- 4. le paysage est généré par un processus connu,

Décrire des entrées spatiales

Le paysage vu comme une variable aléatoire

$$\mathcal{P} = \underbrace{\text{Patron moyen}} + \varepsilon$$

Caractérisé par des descripteurs θ_i



Quatre cas possibles :

- ▶ le paysage est généré par un processus inconnu,
 1. pas de caractérisation du patron moyen,
 2. descripteurs exhaustifs,
 3. descripteurs non-exhaustifs.
- 4. le paysage est généré par un processus connu,

Analyser des sorties spatio-temporelles



Trois stratégies possibles :

1. Calculer des **indices ponctuels** et rechercher des correspondances avec des caractéristiques du paysage (*cf Saint-Geours et al., 2014*)
→ difficilement adaptable lorsque le paysage change.
2. **Agréger les indices de sensibilité** via une analyse multivariée préliminaire (*cf Lamboni et al., 2011*)
→ approche plutôt locale (au sens géographique) difficile à appliquer à l'ensemble d'un paysage.
3. **Résumer la sortie spatiale** en une variable non spatiale
→ perte d'information, multiplication des statistiques résumées.

Analyser des sorties spatio-temporelles



Trois stratégies possibles :

1. Calculer des **indices ponctuels** et rechercher des correspondances avec des caractéristiques du paysage (*cf Saint-Geours et al., 2014*)
→ difficilement adaptable lorsque le paysage change.
2. **Agréger les indices de sensibilité** via une analyse multivariée préliminaire (*cf Lamboni et al., 2011*)
→ approche plutôt locale (au sens géographique) difficile à appliquer à l'ensemble d'un paysage.
3. **Résumer la sortie spatiale** en une variable non spatiale
→ perte d'information, multiplication des statistiques résumées.

Analyser des sorties spatio-temporelles

Trois stratégies possibles :

1. Calculer des **indices ponctuels** et rechercher des correspondances avec des caractéristiques du paysage (*cf Saint-Geours et al., 2014*)
→ difficilement adaptable lorsque le paysage change.
2. **Agréger les indices de sensibilité** via une analyse multivariée préliminaire (*cf Lamboni et al., 2011*)
→ approche plutôt locale (au sens géographique) difficile à appliquer à l'ensemble d'un paysage.
3. **Résumer la sortie spatiale** en une variable non spatiale
→ perte d'information, multiplication des statistiques résumées.

Analyser des sorties spatio-temporelles

Trois stratégies possibles :

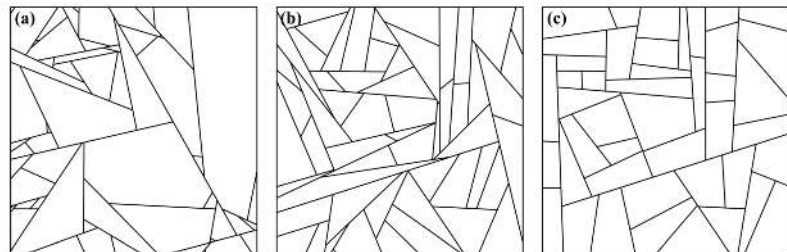
1. Calculer des **indices ponctuels** et rechercher des correspondances avec des caractéristiques du paysage (*cf Saint-Geours et al., 2014*)
→ difficilement adaptable lorsque le paysage change.
2. **Agréger les indices de sensibilité** via une analyse multivariée préliminaire (*cf Lamboni et al., 2011*)
→ approche plutôt locale (au sens géographique) difficile à appliquer à l'ensemble d'un paysage.
3. **Résumer la sortie spatiale** en une variable non spatiale
→ perte d'information, multiplication des statistiques résumées.



Exemples de modèles en épidémiologie du paysage

Le modèle

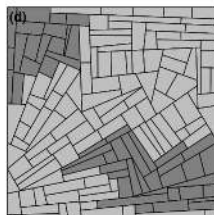
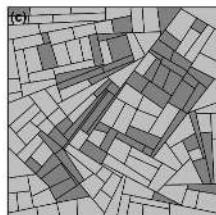
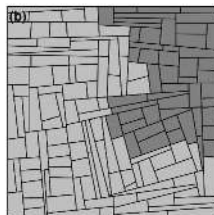
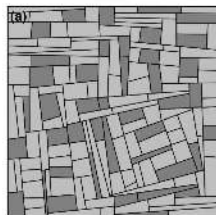
Simulation d'un parcellaire à partir de descripteurs paysagers



Algorithme de tessellation aléatoire (Kiêu et *al.*, 2013) qui permet de contrôler le **nombre de parcelles** (a), la **variabilité des aires** (b) et leur **forme** (c).

Le modèle

Allocation des cultures



Allocation de deux cultures par recuit simulé en contrôlant les **proportions** des cultures (en terme de surface couverte) et l'**agrégation spatiale**.

Le modèle

Couplage avec un modèle SEIR (ici version déterministe mais stochastique par la suite)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_i}{dt} = -e_{c(i)}\pi\left(\frac{S_i}{K_i}\right)r \sum_j m_{ji} l_j \\ \frac{dE_i}{dt} = e_{c(i)}\pi\left(\frac{S_i}{K_i}\right)r \sum_j m_{ji} l_j - \frac{1}{\tau} E_i \\ \frac{dI_i}{dt} = \frac{1}{\tau} E_i - \frac{1}{T} I_i \\ \frac{dR_i}{dt} = \frac{1}{T} I_i \end{array} \right.$$

S : plante saine

E : plante infectée latente

I : plante infectieuse

R : plante morte

$\pi(\cdot)$: fonction de contamination

e : efficacité d'infection

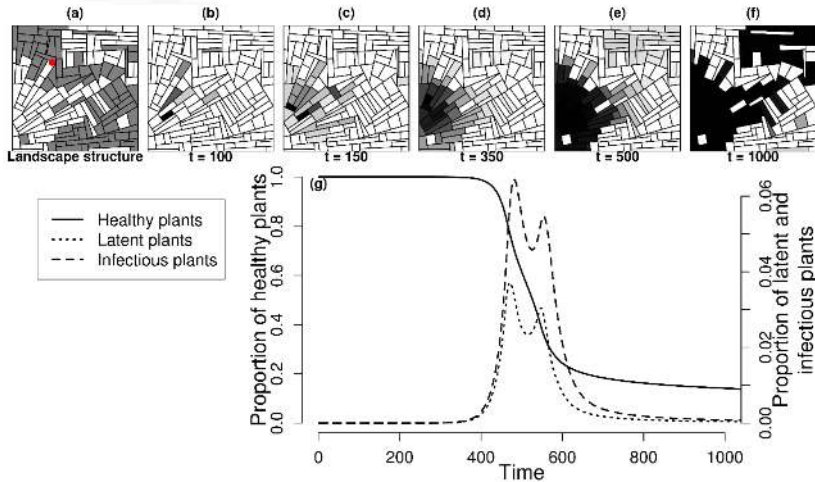
r : production de spores

τ : période de latence

T : période de sporulation

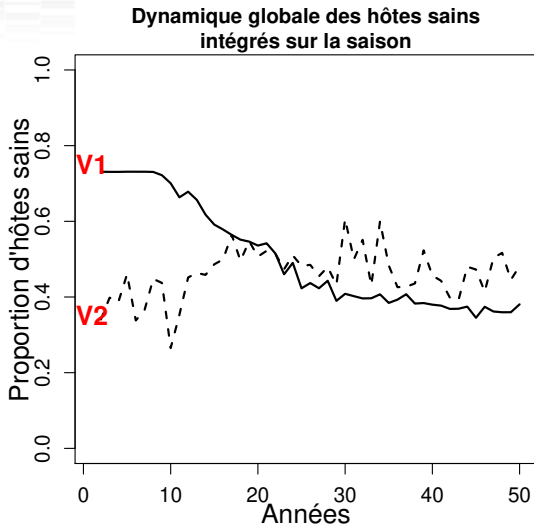
Le modèle

Exemple de simulation



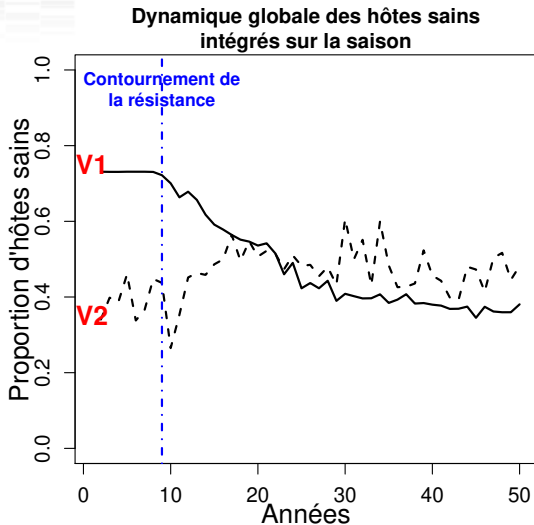
Le modèle

Exemple : dynamique inter-annuelle des hôtes sains



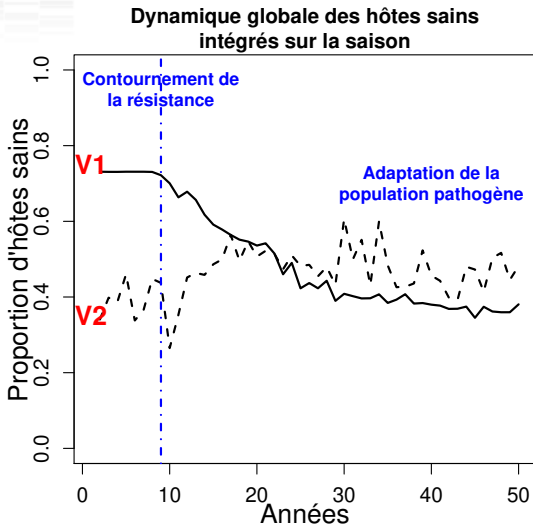
Le modèle

Exemple : dynamique inter-annuelle des hôtes sains



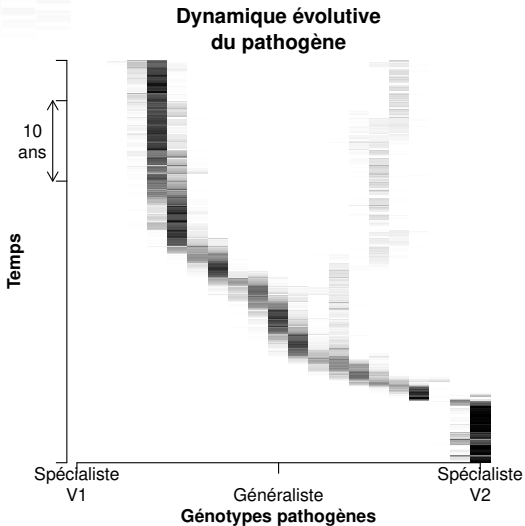
Le modèle

Exemple : dynamique inter-annuelle des hôtes sains



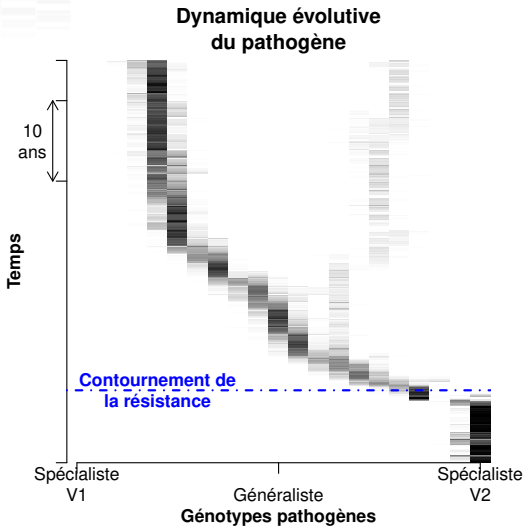
Le modèle

Exemple : évolution de la population pathogène



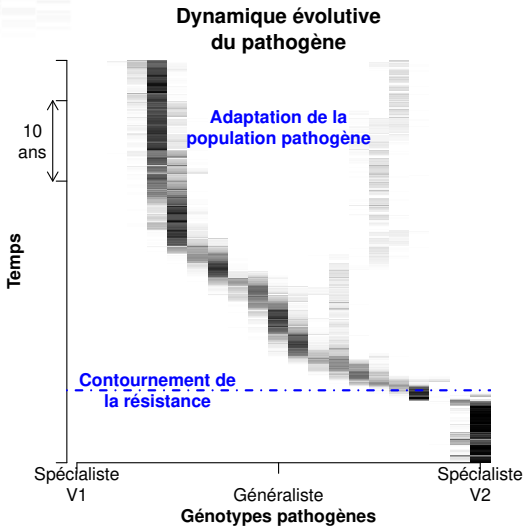
Le modèle

Exemple : évolution de la population pathogène



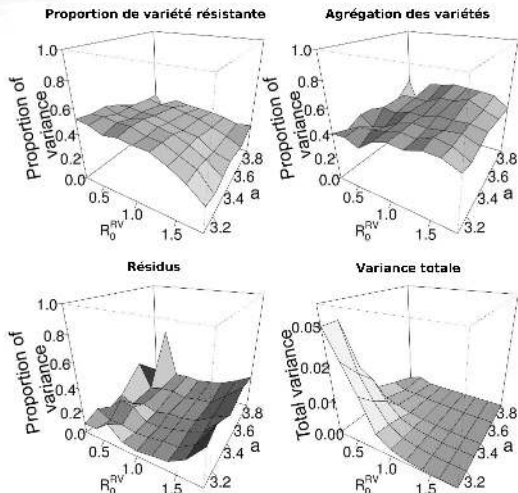
Le modèle

Exemple : évolution de la population pathogène



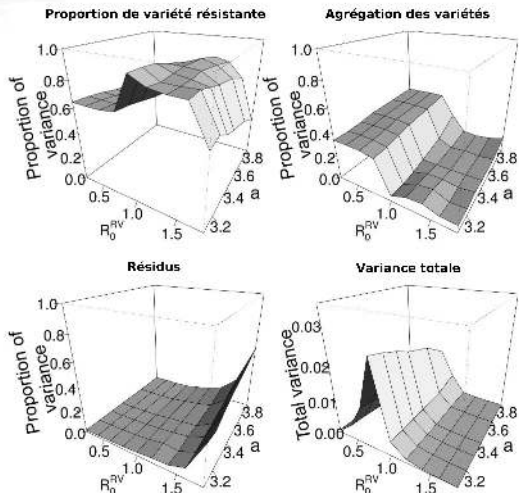
Niveau moyen de maladie

Décomposition de la variance et calcul d'indices totaux



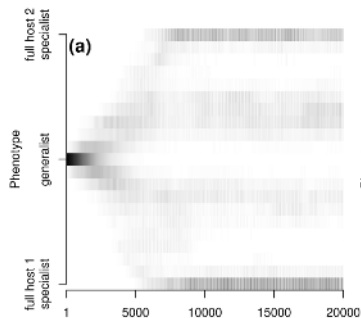
Niveau moyen de maladie

Décomposition de la variance et calcul d'indices totaux



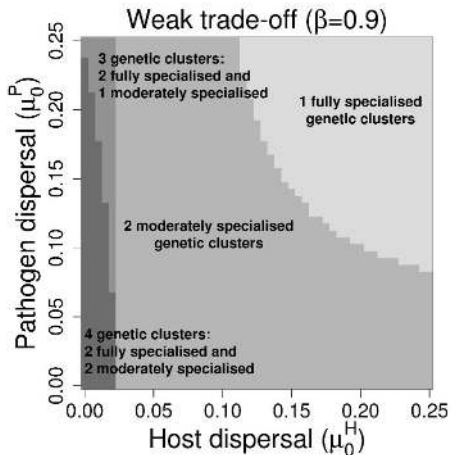
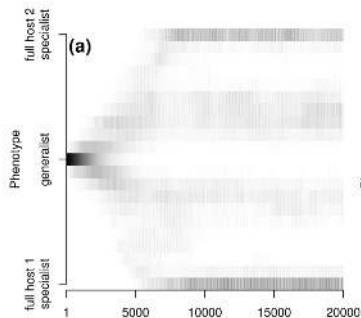
Composition de la population pathogène globale

Prédiction des sorties avec un modèle multinomial



Composition de la population pathogène globale

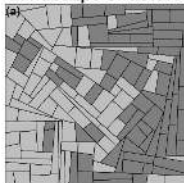
Prédiction des sorties avec un modèle multinomial



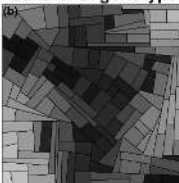
Répartition des génotypes dans l'espace

Régression en fonction de variable paysagères

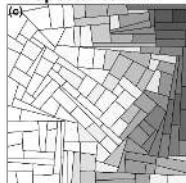
Landscape structure



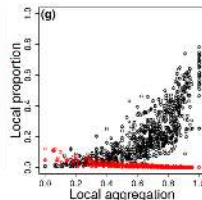
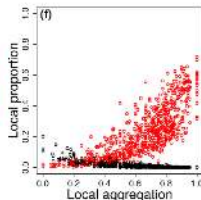
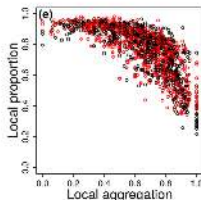
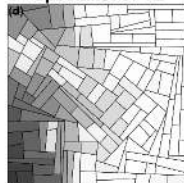
Generalist genotype



Specialist of V1

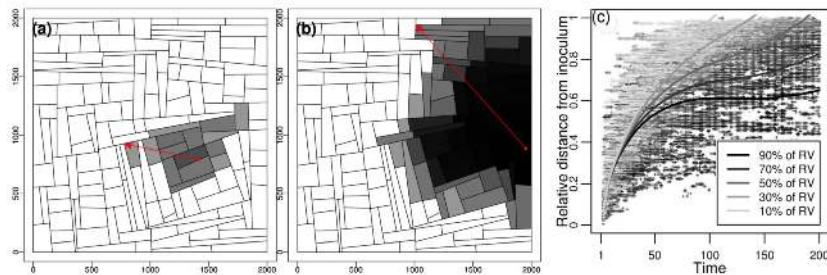


Specialist of V2



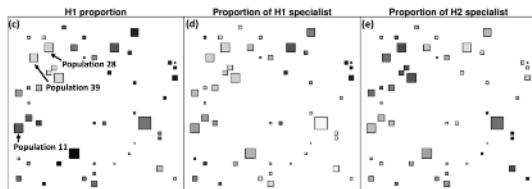
Vitesse de propagation de l'épidémie

Modèle mixte pour évaluer le déplacement du front de propagation de l'épidémie



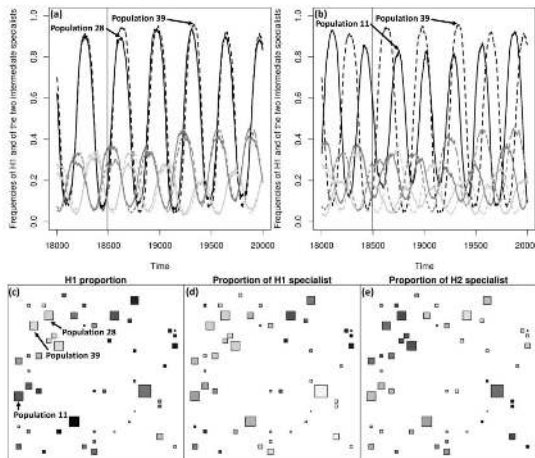
Synchronie entre populations hôtes et conséquences pour les populations pathogènes

Structure spatiale observée



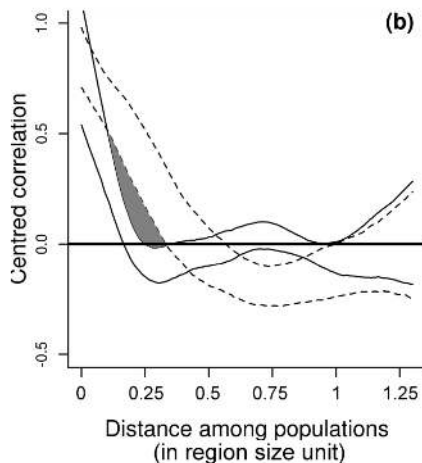
Synchronie entre populations hôtes et conséquences pour les populations pathogènes

Structure spatiale observée



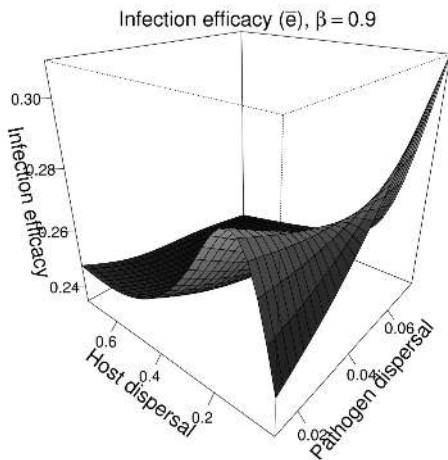
Synchronie entre populations hôtes et conséquences pour les populations pathogènes

Corrélogrammes



Synchronie entre populations hôtes et conséquences pour les populations pathogènes

Conséquences pour l'adaptation de la population pathogène





Conclusion

Conclusions et perspectives

- ▶ **Diversité des sorties résumées** pour bien explorer les différentes facettes du modèle.
- ▶ Prise en compte des **différentes sources de stochasticité** (paysage, modèle).
- ▶ Meilleure **prise en compte de l'espace et du temps** dans l'analyse de sensibilité.
- ▶ Lien avec l'**estimation de paramètres**.

Conclusions et perspectives

- ▶ **Diversité des sorties résumées** pour bien explorer les différentes facettes du modèle.
- ▶ Prise en compte des **différentes sources de stochasticité** (paysage, modèle).
- ▶ Meilleure **prise en compte de l'espace et du temps** dans l'analyse de sensibilité.
- ▶ Lien avec l'**estimation de paramètres**.

Conclusions et perspectives

- ▶ **Diversité des sorties résumées** pour bien explorer les différentes facettes du modèle.
- ▶ Prise en compte des **différentes sources de stochasticité** (paysage, modèle).
- ▶ Meilleure **prise en compte de l'espace et du temps** dans l'analyse de sensibilité.
- ▶ Lien avec l'**estimation de paramètres**.

Conclusions et perspectives

- ▶ **Diversité des sorties résumées** pour bien explorer les différentes facettes du modèle.
- ▶ Prise en compte des **différentes sources de stochasticité** (paysage, modèle).
- ▶ Meilleure **prise en compte de l'espace et du temps** dans l'analyse de sensibilité.
- ▶ Lien avec l'**estimation de paramètres**.

Conclusions et perspectives

- ▶ **Diversité des sorties résumées** pour bien explorer les différentes facettes du modèle.
- ▶ Prise en compte des **différentes sources de stochasticité** (paysage, modèle).
- ▶ Meilleure **prise en compte de l'espace et du temps** dans l'analyse de sensibilité.
- ▶ Lien avec l'**estimation de paramètres**.



MERCI! :)